第47卷 第10期
2024年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 10
Oct. 2024

近40 a流域气候变化与人类活动双重驱动下乌梁素海面积变化特征研究

孙金容[1]， 李 兴[2]， 魏敬铤[3]

（1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院,内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古师范大学节水农业工程研究中心,内蒙古 呼和浩特 010022；3. 内蒙古自治区环境科学学会,内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要：湖泊面积变化是流域气候变化和人类活动的指示剂,明确湖泊面积时空动态过程是评估湖泊生态环境变化及其影响的基础。基于Landsat系列卫星影像,利用监督分类法提取1986—2021年乌梁素海面积;采用一元线性回归、M-K趋势、突变检验对乌梁素海流域的气温、降水量、相对湿度、潜在蒸散发进行了趋势、突变分析;收集流域人类活动数据,运用相关性和多元线性回归分析了气候变化和人类活动对湖泊面积变化的影响。结果表明:(1) 乌梁素海面积从316.19 km^2波动增加到332.34 km^2,增加了5.11%;流域气温显著上升、降水增加幅度小且不显著,相对湿度和潜在蒸散发呈增加趋势,流域气候整体变暖。(2) 湖泊面积与气温、降水量呈正相关,与相对湿度、潜在蒸散发呈负相关,流域人口、国内生产总值、农作物播种面积与湖泊面积均呈显著正相关。(3) 2002—2021年湖泊面积扩大,GDP贡献率为76.83%,人口贡献率为18.37%,潜在蒸散发贡献率为7.73%,湖泊面积变化受人类活动影响更大。

关 键 词：湖泊面积；水体指数；气候变化；人类活动；驱动因素

文章编号：1000－6060(2024)10－1688－12(1688～1699)

湖泊承担着调蓄滞洪、水资源供给、生物多样性保护等多种生态功能,是保障流域水生态安全不可缺少的屏障[1]。社会迅速发展、人口增加、工业占比增大,引起水资源严重短缺,许多湖泊面临面积快速减小、水量减少等问题。刘烨焜[2]发现气温、短期内蒸发量、降水量气象因子对水体面积变化影响较大,人类活动造成的工农业用水量增加、水源补给、渠道阻塞改变着湖泊演化方向。张璐等[3]利用水量平衡法分析影响呼伦湖水量的主要因素,得出入湖径流是调控呼伦湖水量的主控因子。李均力等[4]表示在长时间尺度上气候波动影响湖泊面积变化。湖泊面积变化是流域降水、蒸发和陆地蓄水量变化之间权衡的结果,受气候变化和人类活动的影响。了解湖泊动态变化,对区域生态环境和社会经济发展具有重要意义。

利用遥感解译提取湖泊水体信息逐渐成为普遍趋势,光学遥感影像水体自动提取方法包括基于像元分类的阈值法和基于目标分类2种[5-6]。阈值法分为单波段阈值法和多波段法[7-8],Li等[9]采用“全域-局部”自适应阈值分割水面提取方法,以归一化水体指数获取水体边界。祁昌贤等[10]基于Google Earth Engine(GEE)遥感云计算平台,计算Landsat卫星影像数据的修正归一化水体指数(MNDWI)、归一化植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI),将满足MNDWI>NDVI或MNDWI>EVI和EVI<0.1的像元判定为水体,提取了三江源区湖泊面积。彭妍菲等[11]基于GEE平台,用Landsat影像计算归一化水体指数(NDWI)、MODIS数据计算NDVI,并采用阈值分割对二者进行重分类从而提取2000—2019年博斯腾湖面积。

收稿日期：2023-12-28； **修订日期**：2024-01-24
基金项目：中央引导地方科技发展资金项目(2020ZY0026);国家自然科学基金项目(52160022)资助
作者简介：孙金容(2000-),女,硕士研究生,主要从事气象水文方面的研究. E-mail: erjin263043@163.com
通讯作者：李兴(1981-),男,副研究员,主要从事水污染控制与水环境保护等方面的研究. E-mail: lixingmm81@imnu.edu.cn

有学者对乌梁素海流域气候变化特征[12]、湖泊水环境演变与评价[13]，冰封期与非冰封期营养物质迁移转化机制[14-15]，植物群落结构及分布[16]、水量平衡[17]等进行了大量研究，对气候变化和人类活动耦合驱动湖泊水文要素改变研究较少。本文基于1986—2021年Landsat卫星遥感影像，获取长时间序列乌梁素海面积，结合流域气象、水文数据、人类活动数据，分析乌梁素海流域气候变化特征，量化人类活动和气候变化对湖泊面积变化的影响，探究气候变化和人类活动对乌梁素海面积耦合驱动，为乌梁素海生态恢复和管理提供依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗，地处后套平原东端，西侧和南侧均为黄河北岸冲积平原，北靠狼山南麓山前冲积平原。地理位置介于40°36′~41°03′N，108°43′~108°57′E之间（图1）。流域处于北方干旱半干旱区，属中温带大陆性气候，太阳辐射强、蒸发强烈，多年平均气温3.7~7.6 ℃，年均降水量为100~200 mm[18]。乌梁素海是河套平原灌溉水利工程的重要组成部分，补给水源主要有排干排水、降水、地下水补给等；水的损耗主要包括水面蒸发、地下渗漏、乌毛计排水闸外排[19]。

1.2　数据来源

用于提取湖泊流域边界的高程数据来源于地理空间数据云（http://www.Gscloud.cn）ASTER GDEM，分辨率30 m。Landsat影像来自地理空间数据云，选取1986—2021年丰水期（7—10月）1期影像，若此时段数据质量无法满足要求，用其他相近时间数据补充，共36期（表1）。Sentinel-2A影像来源于美国地质勘探局USGS（https://earthexplorer.usgs.gov/），空

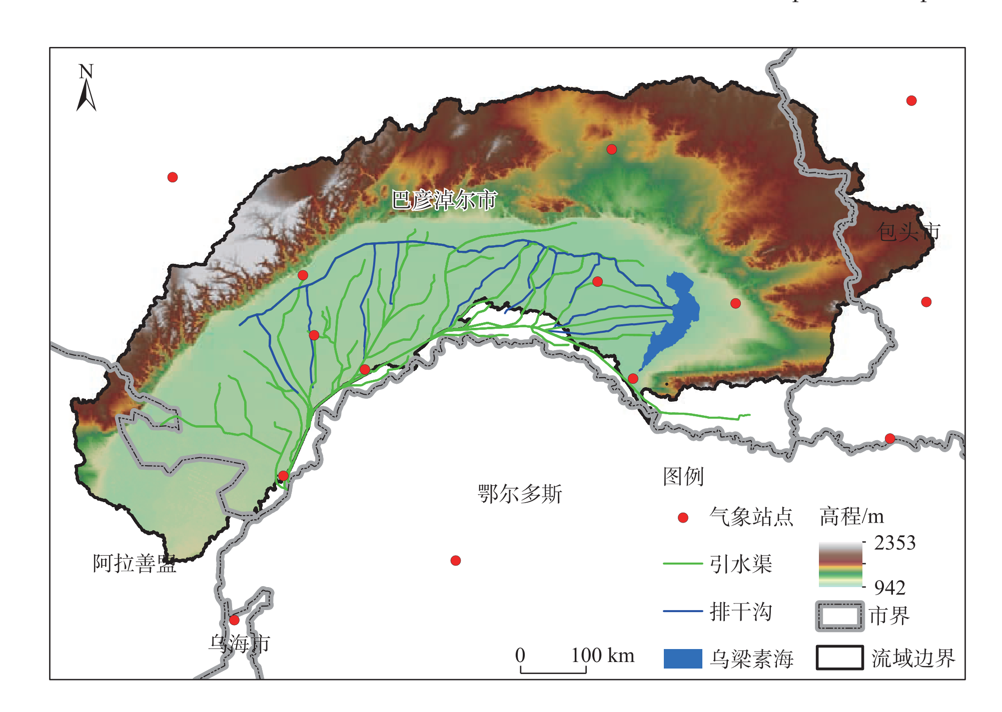


图1　乌梁素海流域示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the Wuliangsuhai Basin

表1　遥感数据信息

Tab. 1　Remote sensing data information

数据系列	影像成像日期(年-月)	行列号	分辨率/m
Landsat5 TM	1986-10、1987-08、1988-08、1989-10、1990-09、1991-07、1992-09、1993-09、1994-07、1998-09、1999-09、2000-08	128/32	30
Landsat7 ETM+	2001-08、2002-09、2004-07、2005-06、2006-07、2007-07、2008-09、2009-06、2010-06、2011-08、2012-08、2014-09	128/32	30
Landsat8 OLI	2013-09、2015-07、2016-06、2017-07、2018-06、2019-07、2020-07、2021-09	128/32	30

间分辨率为10 m。气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn),选取乌梁素海周边13个气象站点(图1)1980—2021年气温、降水、相对湿度日尺度数据。流域1986—2021年八排干、九排干、十排干、总排干等历年入湖水量,乌毛计闸出湖水量来自巴彦淖尔市水文局。流域和巴彦淖尔市大部分重合,社会经济数据选用1986—2021年巴彦淖尔市的人口数、国内生产总值(GDP)、农作物播种面积,数据来源于《内蒙古自治区统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 湖泊水面提取方法 在ENVI中对Landsat影像数据进行辐射定标、大气校正等预处理,选用NDWI、MNDWI、谱间关系法[20]和最大似然监督分类4种方法提取乌梁素海水体面积(表2)。

表2 水体指数计算公式

Tab. 2 Formula for calculating water index

水体指数	计算公式	作者
NDWI	NDWI=(Green−NIR)/(Green+NIR)	Mcfeeters[21]
MNDWI	MNDWI=(Green−MIR)/(Green+MIR)	徐涵秋[22]
谱间关系	Green+Red>NIR+SWIR1	周成虎[23]

注:Green为绿波;Red为红波;NIR为近红外;MIR为中红外;SWIR1为短波红外1;NDWI为归一化水体指数;MNDWI为修正的归一化水体指数。下同。

利用Sentinel-2A人工目视解译的水体与非水体作为参考,通过建立混淆矩阵,计算总体分类精度、Kappa系数、制图精度以及用户精度对4种方法提取结果进行对比分析,选择最适合乌梁素海水体提取的方法。

1.3.2 数据分析方法 采用联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式[24]计算潜在蒸散发量(ET_0),公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta\left(R_n - G\right) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2\left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0.34u_2\right)} \quad (1)$$

式中:ET_0为蒸散发;Δ为饱和水汽压与温度曲线上的斜率;R_n为净辐射;G为土壤热通量;γ为湿度计算常数;T为地面以上2 m高度处空气温度;u_2为地面以上2 m高处风速;e_s为饱和蒸汽压;e_a为实际水汽压。

利用线性倾向估计法[25]计算气候要素的变化速率,分析研究期间湖泊面积、气温、降水量、相对湿度、潜在蒸散发变化趋势;采用Mann-Kendall检验法[26],分析流域内气象要素变化趋势显著性和突变性。

采用相关性分析找出影响湖泊面积的主要因素。通过多元线性回归方法,求出各影响因子的回归系数,计算不同因素对湖泊变化的贡献率[27-28]。

2 结果与分析

2.1 乌梁素海面积变化特征

乌梁素海生长着大面积芦苇,NDWI和MNDWI不能将湖泊的芦苇水面和陆地准确区分出来(图2),但MNDWI提取明水面效果比NDWI好。谱间关系法不能区分湖区周边植被和湖区,将湖区东北部分植被识别为水体。最大似然监督分类提取的效果最好。

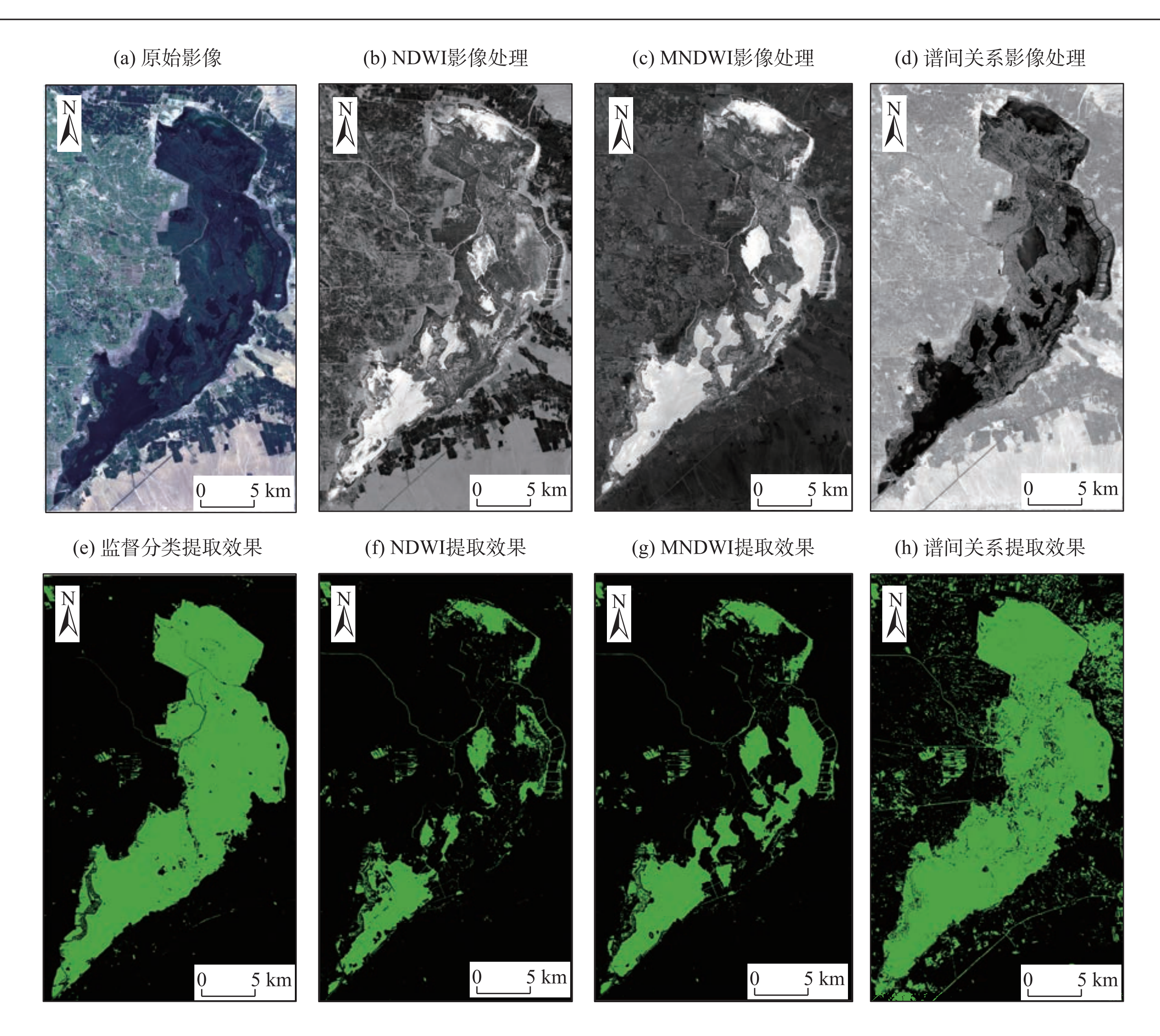
4种不同的水体提取模型中,NDWI的总体分类精度、Kappa系数、制图精度最差(表3),分别为39.62%、0.0725、15.68%,与其他方法相比,精度低,不适合提取研究区水体。监督分类总体分类精度97.80%,Kappa系数为0.9498,且其制图精度和用户精度均较高,说明监督分类提取效果较好。综合得出4种水体提取模型的精度高低依次排列为监督分类>谱间关系>MNDWI>NDWI。最后选定监督分类提取乌梁素海面积。

1986年以来乌梁素海面积变化呈显著增加趋势(Z=3.36,P<0.01)(图3、表4),研究期间,乌梁素海面积年均值为338.36 km^2,变异系数为4.77%,湖泊面积相对稳定,湖泊面积最大值为2012年的371.62 km^2。M-K突变检验结果表明,乌梁素海水体面积在2001年发生突变。1986—2001年面积年均值为326.07 km^2,2002—2021年面积年均值348.20 km^2,增加了22.13 km^2。

湖泊西岸面积变化幅度较大,东岸面积变化较小(图4a~b)。湖泊西岸从北到南依次有总排干、八排干、通济渠、九排干、长济渠、塔布渠、十排干等引水渠和排水沟与湖泊相连,受农田灌溉退水和黄河生态补水影响,水面积变化大。

2.2 乌梁素海流域气候变化特征

乌梁素海气象要素变化趋势(表5、图5a~d)表示,1980—2021年,乌梁素海流域年均气温呈显著增加趋势(Z=5.28,P<0.01),增长速率为0.53 ℃·$(10a)^{-1}$,多年平均气温为7.09 ℃;年平均降水量增长



注：NDWI为归一化水体指数；MNDWI为修正的归一化水体指数。

图2　不同方法识别水体结果对比

Fig. 2　Comparison of the results of different methods for identifying water bodies

表3　水体提取精度验证

Tab. 3　Verification of water extraction accuracy

水体提取方法	总体分类精度/%	Kappa系数	制图精度/%	用户精度/%
NDWI	39.62	0.0725	15.68	91.68
MNDWI	43.19	0.1202	26.42	93.86
谱间关系	55.42	0.3195	91.26	73.83
监督分类	97.80	0.9498	96.81	96.43

速率为6.57 mm·(10a)$^{-1}$，增加趋势不显著(Z=0.82，P>0.05)，流域多年平均降水量为197.14 mm；年均相对湿度呈下降趋势(Z=−1.56，P>0.05)，下降速率为0.38%·(10a)$^{-1}$，多年平均相对湿度为47.58%；潜在蒸散发上升速率为1.17 mm·(10a)$^{-1}$(Z=0.20，P>0.05)，多年平均潜在蒸散发为1144.98 mm；乌梁素海流域气温近40 a来趋于暖干化。M-K突变检验(图6a~d)表明，流域气温、平均相对湿度、潜在蒸散发分别在1997、2009、2016年发生突变，降水突变不明显。

2.3　入湖排干水量变化

总排干接纳河套灌区一至七排干退水，经红圪卜扬水站排入乌梁素海，是灌区气候水文的重要反映。1986—2021年总干排水量呈波动上升趋势(图7)，最大排水量9.27×10^8 m^3(2019年)，最小排水量2.357×10^8 m^3(1991年)。1986—2021年平均入湖水量为5.14×10^8 m^3。

1986—2021年总入湖水量呈上升趋势，最大总入湖水量为10.31×10^8 m^3(2020年)，最小总入湖水量为3.59×10^8 m^3(2003年)，1986—2021年36 a的总入湖水量年均值为6.15×10^8 m^3。1986—2021年乌毛计闸年均退水量为2.84×10^8 m^3，最大退水量为8.11×10^8 m^3(2018年)，最小退水量为0.11×10^8 m^3

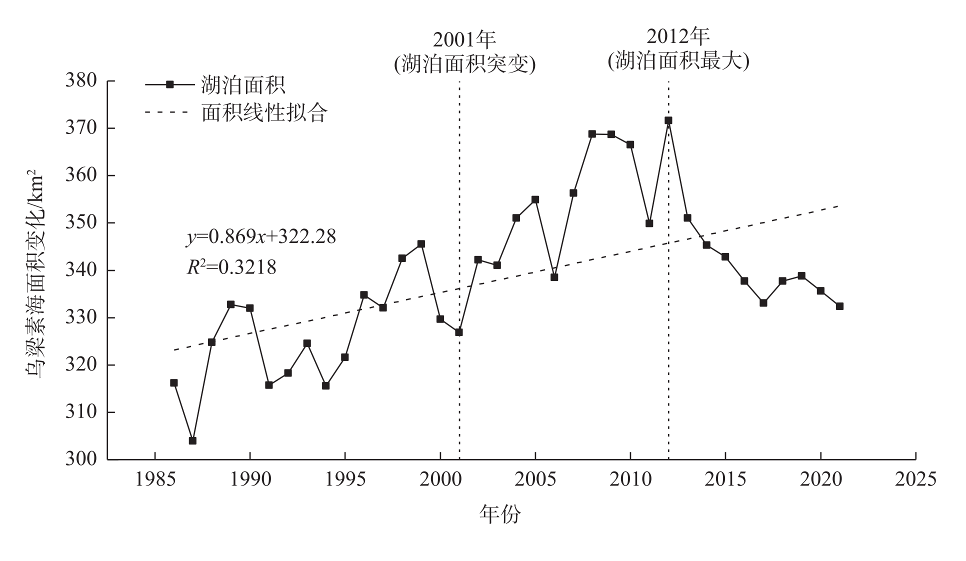


图3 1986—2021年湖泊面积历年变化

Fig. 3 Annual changes in lake area from 1986 to 2021

表4 1986—2023年水体面积变化统计

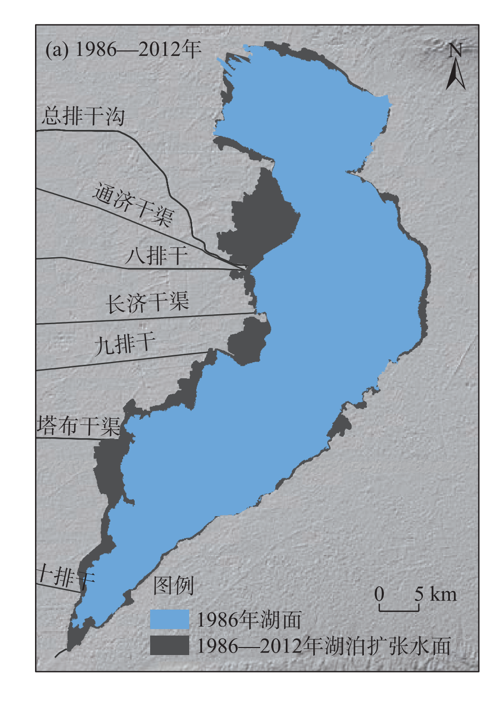
Tab. 4 Statistics of water area change from 1986 to 2023

年份	变化量/km²	变化率/%	变异系数/%	平均值/km²
1986—2021年	16.14	5.11	4.77	338.36
1986—2001年	10.67	3.37	3.30	326.07
2002—2021年	−9.88	−2.89	3.62	348.20

(2005年)。总入湖水量和退水量变化趋势一致,维持了乌梁素海基本生态需水。近年由于乌梁素海的生态补水,入湖水量有所上升,湖泊退水量逐渐增多,入湖水量和出湖水量的差值在减小(图7),湖区截留水量变多,耗水量增加。生态补水前期湖泊面积增大,后期面积开始减少,流域人类活动一定程度上抵消了生态补水带来的面积扩大。

2.4 乌梁素海人类活动变化

1986—2021年巴彦淖尔市国内生产总值呈现增长趋势(图8)。从1986年1.55×10⁹元增加到2021年9.82×10¹⁰元,增加了9.67×10¹⁰元。人口呈现先增



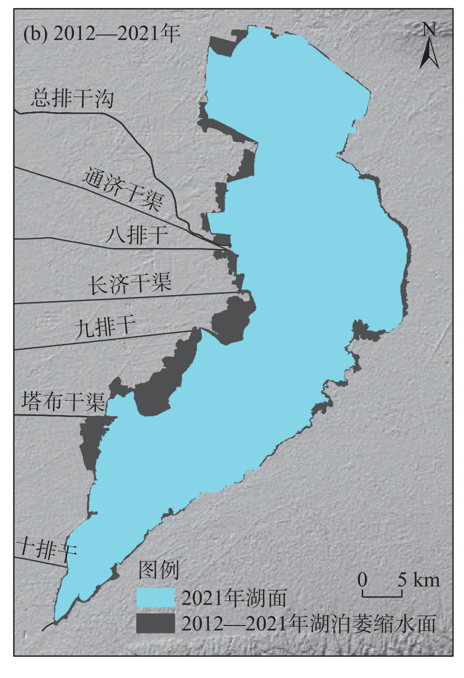


图4 湖泊面积变化

Fig. 4 Changes in lake area

表5 1980—2021年乌梁素海流域气象要素变化倾向率和趋势检验值(*Z*值)

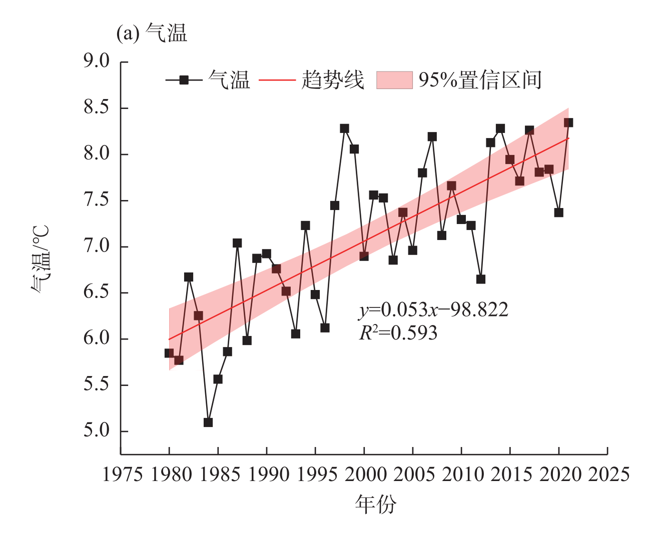
Tab. 5 Test values of the change tendency rate and trend of meteorological elements in the Wuliangsuhai Basin from 1980 to 2021 (*Z*-value)

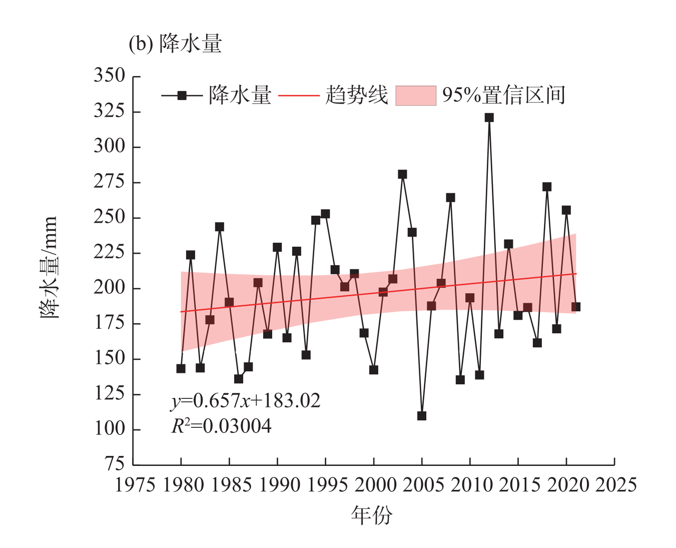
气象因子	倾向率/$(10a)^{-1}$	线性趋势检验	趋势统计量(*Z*)	M-K趋势检验	变化趋势
气温/℃	0.529	<0.01	5.088	显著	上升
降水量/mm	6.566	>0.05	0.505	不显著	上升
相对湿度/%	1.166	>0.05	−1.898	不显著	下降
潜在蒸散发/mm	14.480	>0.05	4.593	不显著	上升

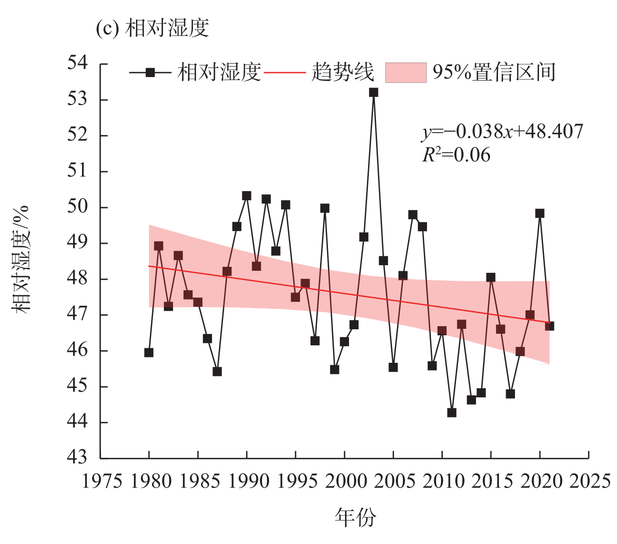
加后减少的变化趋势，从1986年(1.45×10^6人)到1999年(1.79×10^6人)人口呈现增长趋势，1999年后呈现阶梯式下降，分别在2000、2010、2020年人口断崖式减少，至2021年有1.52×10^6人。1986—2021年巴彦淖尔市农作物播种面积整体呈现增长趋势，1986年农作物播种面积最小为2.83×10^5 hm²，2020年农作物播种面积最大为7.60×10^5 hm²，较1986年增加了4.77×10^5 hm²。国内生产总值、农作物播种面积均呈显著上升趋势。

2.5 乌梁素海面积变化原因分析

2.5.1 相关分析 对乌梁素海面积变化与气温、降水量、相对湿度、潜在蒸散发、巴彦淖尔市人口、国内生产总值、农作物播种面积进行Pearson相关分析(表6)。乌梁素海面积与降水量呈正相关，相关系数为0.176(P>0.05)，降雨增加了流域径流量和入湖泊水量，湖泊面积增大。乌梁素海面积与研究区气温呈正相关，相关系数为0.351(P<0.05)，气温越高，灌区的作物生长耗水越多，灌区灌溉用水增加，经







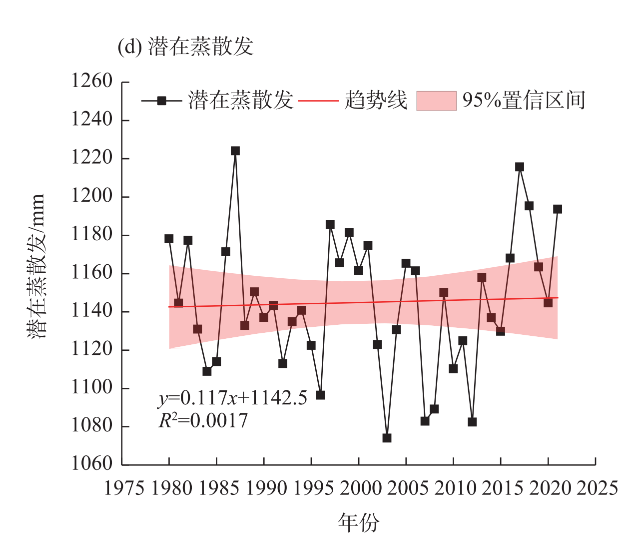


图5 气象要素趋势变化

Fig. 5 Trend change of meteorological elements

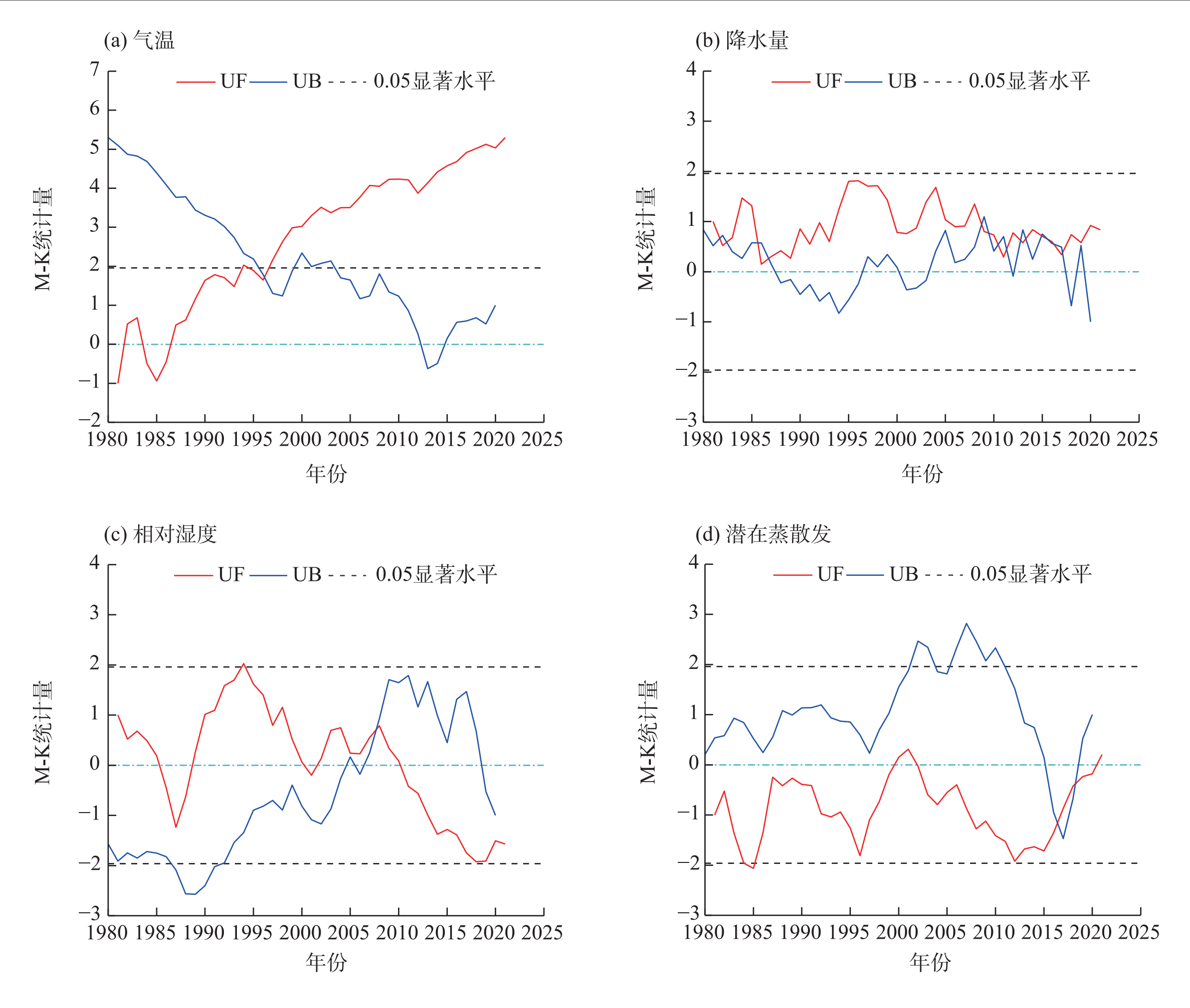


图6 气象要素突变分析

Fig. 6 Analysis of sudden changes in meteorological elements

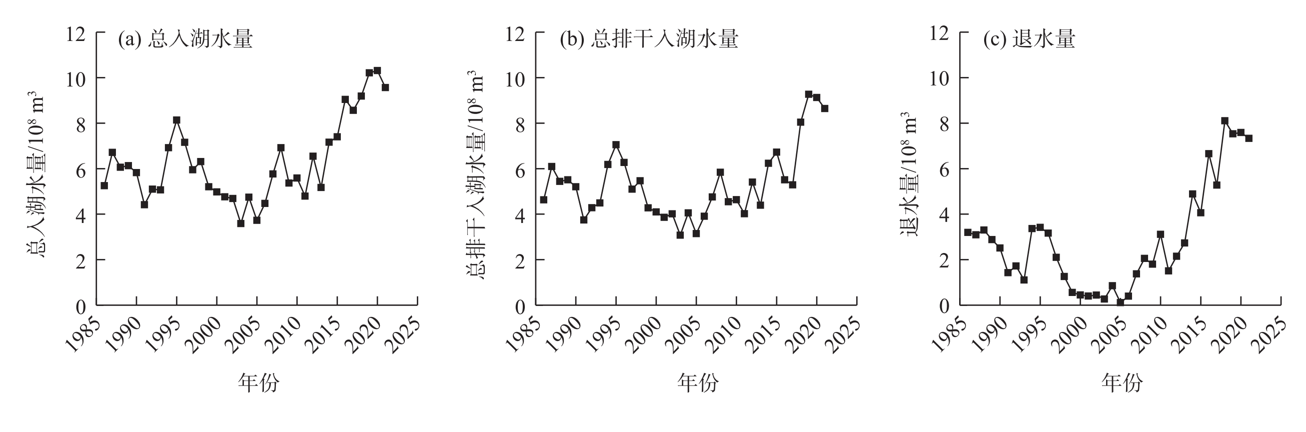


图7 1986—2021年乌梁素海进出水量

Fig. 7 Water inflow and outflow from Wuliangsuhai Lake from 1986 to 2021

灌溉后排入湖泊水量增加使湖泊面积进一步扩大。相对湿度、潜在蒸散发与湖泊面积呈负相关，相关系数分别为−0.132（P>0.05）、−0.428（P<0.05）。乌梁素海流域的暖干化威胁流域产水量，减弱入湖径流，间接缩小了湖泊面积。

人口、国内生产总值、农作物播种面积与乌梁素海面积呈现显著正相关，相关系数分别为0.587（P<0.01）、0.462（P<0.01）、0.432（P<0.01），总入湖水量与湖泊面积呈负相关，相关系数为−0.149（P>0.05）。乌梁素海流域人类活动复杂，农作物播种面

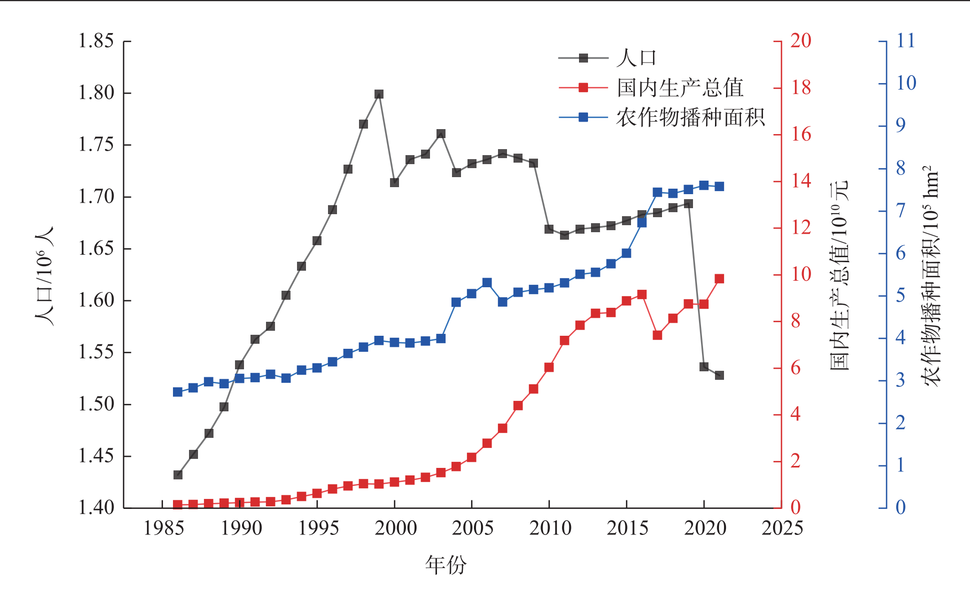


图8　1986—2021年人类活动指标变化

Fig. 8　Changes in human activity indicators from 1986 to 2021

表6　1986—2021年湖泊面积与气候、人类活动指标相关系数

Tab. 6　Correlation coefficients between lake area and climate and human activity indicators from 1986 to 2021

指标	气温	降水量	相对湿度	潜在蒸散发
相关系数	0.351*	0.176	−0.132	−0.428**
指标	人口	国内生产总值	农作物播种面积	总入湖水量
相关系数	0.587**	0.468**	0.432**	−0.149

注：*、**分别表示在0.05、0.01水平(双侧)显著相关。

表7　湖泊面积与水文气象、人类活动偏回归系数及其*t*检验

Tab. 7　Lake area and hydrometeorology, partial regression coefficients of human activities and their *t*-test

影响因子	系数	标准化系数	*t*	显著性*P*
常量	414.594	–	6.646	0.013
人口	0.573	0.341	3.209	0.003
国内生产总值	0.031	0.685	5.338	0.001
潜在蒸散发	−0.140	−0.313	−3.100	0.004
总入湖水量	−3.459	−0.395	−2.954	0.006

积扩大、土地利用变化增加了潜在蒸散发，流域产水量减少，需要更多水用于当地生活和植被生长，生态补水量增大，湖泊面积变大。

2.5.2　*贡献率分析*　建立面积与其他指标之间的多元线性回归模型，依次剔除与面积相关性不显著的指标，逐次引入与面积相关性显著的指标，最终确定模型方程[29]，用于分析湖泊面积变化原因，为面积变化预测提供参考。模型的拟合优度R^2值为0.713，自变量可以解释因变量约71.3%的变化，对自变量中各因子回归系数的显著性检验，潜在蒸散发、人口和国内生产总值的显著性*P*小于0.05，自变量的回归检验具有显著性。得到多元线性回归方程为$y=0.573x_1+0.031x_2-0.140x_3-3.459x_4+414.594$(表7)。

根据线性回归方程计算湖泊面积模拟值，以遥感卫星提取值为横坐标，对应年份的模拟值为纵坐标制作散点图(图9)，模拟值与实测值对应的点大部分均匀分布在45°斜线两侧，多元回归方程对湖泊面积拟合效果较好。

以湖泊面积突变2001年为准，将1986—2021年划分为基准期，分析2002—2021年面积上升期间各因子相较于基准期对面积变化的贡献程度(表8)。2002—2021年与1986—2001年相比，乌梁素海年平均面积增加了22.13 km²。乌梁素海面积变化中，人口增加7.10×10^4人，使湖泊面积增加了4.07 km²，国内生产总值增加了5.49×10^{10}元，使得湖泊面积增大了17.00 km²，而潜在蒸散发下降12.21 mm，使得湖泊面积增加1.71 km²，入湖水量增加了0.67×10^8 m³，导致湖泊面积下降了2.34 km²。

人口增加、国内生产总值、潜在蒸散发减少对湖泊面积的贡献率为分别为18.37%、76.83%、7.73%，使得湖泊面积扩大了22.78 km²，入湖水量对

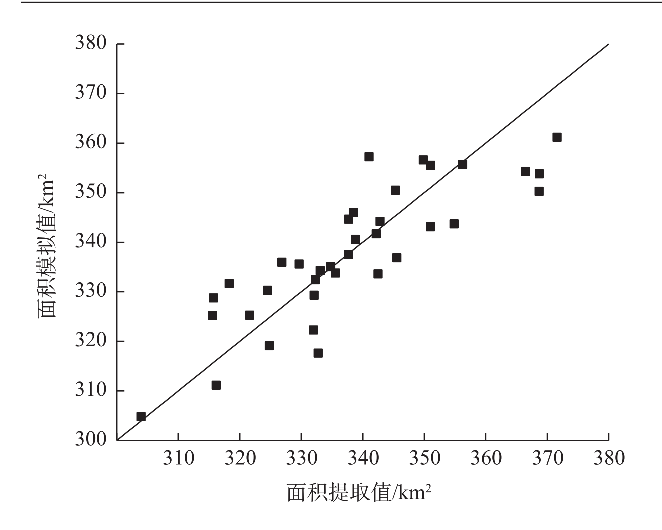


图9 乌梁素海面积提取值与模拟值对应关系

Fig. 9 Correspondence between the extracted and simulated area values of Wuliangsuhai Lake

表8 1986—2001年与2002—2021年相比影响因子对湖泊面积变化的影响量及贡献率

Tab. 8 Influence and contribution rate of influencing factors on lake area change from 1986 to 2001 and from 2002 to 2021

影响因子	影响因子变化	湖泊面积变化/km²	贡献率/%
人口	7.10×10^4人	4.07	18.37
GDP	5.49×10^{10}元	17.00	76.83
潜在蒸散发	−12.21 mm	1.71	7.73
入湖水量	0.68×10^8 m³	−2.34	−10.57

面积的贡献率为−10.57%,使得湖泊面积缩小了2.34 km²。其他因素对面积的贡献率为7.64%。贡献率结果说明人类活动对乌梁素海面积影响更大,但乌梁素海面积变化的影响因素复杂,需要进一步探讨。

3 讨论

40 a气象数据表明,乌梁素海地区气温上升、降水量变化幅度不大,潜在蒸散发增加。马龙等[30]的研究表明河套地区近50 a增温趋势明显,降水处于波动下降之中。张保龙等[31]分析了乌梁素海流域近60 a气候变化,表示气温、降水量都呈现出上升趋势。说明乌梁素海流域在经历一个变干过程,与全球大部分地区气候变暖趋势一致[32]。

乌梁素海面积在研究时段变化较为稳定,呈轻微增加趋势,在2001年发生突变,2012年湖泊面积达到最大,而后有所下降。李山羊等[33]表示乌梁素海1996年面积基本达到稳定,1966—2014年湿地面积缓慢扩张。李帅等[34]通过高分一号反演乌梁素海面积表示,2014—2021年面积变化较小,乌梁素海库容整体呈现下降趋势。在流域水文循环中,降雨是湖泊最直接的水量补给来源,特别对处于干旱-半干旱的湖泊,降水减少容易导致河流断流、湖泊干涸消失[35],乌梁素海流域降水与湖泊面积相关性不显著,表明降水所产生的径流量大部分被人为截流和消耗。乌梁素海湖泊面积与气温呈显著的正相关(r=0.351,P<0.5),与张娜等[36]的研究蒸发量增加,水域面积和水位下降,湖泊萎缩相反,是由于种植人工芦苇使湖泊面积维持在一定水平。乌梁素海芦苇面积为134.243 km²,水域面积为161.092 km²,芦苇面积约占乌梁素海总面积的1/2[37],自1988年开始种植人工芦苇,人工芦苇面积一直在扩大,1991年人工芦苇面积14.46 km²,到2004年人工芦苇种植面积28.12 km²[38]。

生态补水量增加也是乌梁素海面积变化的一个重要因素,本研究发现生态补水与湖泊面积突变时间相对应,说明生态补水促进了湖泊面积增加。乌梁素海是一个河迹湖,乌梁素海西部流域主要由"黄河引水-黄河故道输水-乌梁素海净化-流回黄河"水循环系统构成[13],流域的干湿程度、径流大小受到三盛公引黄水量的影响,2005年开始对乌梁素海实施生态补水工程,但引入的生态补水量并不明显。2012年排干水利设施改善后开始加大补水力度,2016年生态补水量达2.5×10^8 m³,2018年增加到5.94×10^8 m³,2019年增加到6.15×10^8 m³。乌梁素海流域以灌溉农田为主,流域人口、国内生产总值、农作物播种面积与湖泊面积的相关分析均呈显著正相关,因此得出研究期间流域强烈的人类活动在消耗更多的水资源的同时,也加大了生产生活用水后的排水量,从而增加了入湖水量。本研究得出乌梁素海近40 a的面积扩张是引黄灌溉退水、湖周芦苇种植所导致的。本文每年仅反演了一期湖泊水面,全年面积代表性较弱;人类活动和气候变化对湖泊面积影响的本质是对水量的影响,还需要从降水、气温、生态补水等对湖泊来水、水量损耗进行详细研究。

4 结论

本文通过1986—2021年遥感影像数据,分析了

典型干旱区湖泊乌梁素海面积变化，通过流域内的多年实测气象、人类活动资料探讨了湖泊面积变化的影响因素，主要结论如下：

（1）研究期间，乌梁素海面积呈增长趋势（Z=3.36，P<0.01），水体面积在2001年发生突变。湖泊面积最小为303.96 km^2（1987年），最大为371.62 km^2（2012年），水面变化为先增大后减小。

（2）乌梁素海流域年均气温呈显著增加趋势（Z=5.28，P<0.01），年平均降水增加趋势不显著（Z=0.82，P>0.05），年均相对湿度呈下降趋势（Z=−1.56，P>0.05），潜在蒸散发上升速率为1.17 mm·(10a)$^{-1}$（Z=0.20，P>0.05），乌梁素海流域近40 a向暖干化转变。流域气温、平均相对湿度、潜在蒸散发分别于1997、2009、2016年发生突变。人类活动各指标均呈增加趋势，流域人类活动不断增强。

（3）乌梁素海面积与降雨量呈不显著正相关，与气温呈显著正相关，与相对湿度、潜在蒸散发，相关系数分别为−0.132（P>0.05）、−0.428（P<0.05）。逐步多元线性回归分析表示对2001—2021年湖泊面积变化贡献率最大的是GDP增加（76.83%），人口增加对湖泊面积扩大的贡献率18.37%，相对于人类活动，潜在蒸散发的贡献率较小7.73%。复杂多变的人类活动是1986—2021年乌梁素海面积扩大的主要原因。

参考文献（References）

[1] Ayele H S, Atlabachew M. Review of characterization, factors, impacts, and solutions of Lake eutrophication: Lesson for Lake Tana, Ethiopia[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(12): 14233−14252.

[2] 刘烨焜. 卫星遥感监测岱海湖面积变化及气象因子影响分析[J]. 内蒙古气象, 2021(5): 34−40. [Liu Yekun. Changes in Daihai Lake area by remote sensing monitoring and analysis of the influence of meteorological factors[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2021(5): 34−40.]

[3] 张璐, 张生, 孙标, 等. 采用水量平衡法分析呼伦湖水域面积变化因素[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 80−85. [Zhang Lu, Zhang Sheng, Sun Biao, et al. Analysis of changing factors of Hulun Lake area by using water balance method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(2): 80−85.]

[4] 李均力, 胡汝骥, 黄勇, 等. 1964—2014年柴窝堡湖面积的时序变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 417−427. [Li Junli, Hu Ruji, Huang Yong, et al. Spatial-temporal characterstics of Chaiwopu Lake area change and its driving factors from 1964 to 2014[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 417−427.]

[5] Li J, Meng Y, Li Y, et al. Accurate water extraction using remote sensing imagery based on normalized difference water index and unsupervised deep learning[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128202, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128202.

[6] 吕娜, 郭梦京, 赵馨, 等. 内陆淡水湖博斯腾湖水质遥感反演及时空演变特征[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 953−966. [Lü Na, Guo Mengjing, Zhao Xin, et al. Remote sensing inversion of water quality and spatiotemporal evolution characteristics of the Bosten Inland Freshwater Lake[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(6): 953−966.]

[7] 李丹, 吴保生, 陈博伟, 等. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(2): 147−161. [Li Dan, Wu Baosheng, Chen Bowei, et al. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2020, 60(2): 147−161.]

[8] 高彦哲, 阿拉腾图娅, 昙娜, 等. 2000—2020年蒙古高原湖泊变化及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 191−200. [Gao Yanzhe, Alatengtuya, Tan Na, et al. Lake changes and their influence factors in the Mongolian Plateau from 2000 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 191−200.]

[9] Li J, Sheng Y. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: A case study in the Himalayas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(16): 5194−5213.

[10] 祁昌贤, 任燕, 彭海月, 等. 基于GEE云平台的三江源湖泊面积提取及动态变化[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 179−185. [Qi Changxian, Ren Yan, Peng Haiyue, et al. Extracting the dynamic change of lake area in the Three-River Headwaters Region based on Google Earth Engine[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research, 2023, 40(7): 179−185.]

[11] 彭妍菲, 李忠勤, 姚晓军, 等. 基于多源遥感数据和GEE平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131−1153. [Peng Yanfei, Li Zhongqin, Yao Xiaojun, et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(6): 1131−1153.]

[12] 康健, 陆俊卿, 汪光, 等. 乌梁素海地区近50年气候变化特征分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(8): 1−8. [Kang Jian, Lu Junqing, Wang Guang, et al. Analysis of characteristics of Wuliangsuhai nearly 50 years of climate change[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(8): 1−8.]

[13] 芦津, 杨瑾晟, 罗菊花, 等. 环境因子及生态补水对乌梁素海“黄苔”年际暴发面积的影响(1986—2021年)[J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1881−1890. [Lu Jin, Yang Jinsheng, Luo Juhua, et al. Impacts of environmental factors and ecological hydration on the interannual changes of metaphytic blooms area in Lake Ulansuhai (1986—2021)[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(6): 1881−1890.]

[14] 杨惠杰, 黄文峰, 张程, 等. 乌梁素海冰封期分层与混合特征及对氧代谢速率的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 972-984. [Yang Huijie, Huang Wenfeng, Zhang Cheng, et al. Stratification and mixing characteristics in Lake Wuliangsuhai during ice-covered period and its impacts on metabolic rates[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 972-984.]

[15] 卢兴顺, 丁晓宇, 赵子闻, 等. 乌梁素海冰封期污染物分布及迁移特征研究[J]. 水生态学杂志. 2021, 42(6): 41-48. [Lu Xingshun, Ding Xiaoyu, Zhao Ziwen, et al. Distribution and exchange of pollutants during the icebound season of Ulansuhai Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(6): 41-48.]

[16] 李建茹, 李兴. 基于SOM的乌梁素海浮游植物群落结构研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 649-657. [Li Jianru, Li Xing. Application of self-organizing map to analysis of phytoplankton community structure in Wuliangsuhai Lake, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(4): 649-657.]

[17] 姜忠峰, 李畅游. 乌梁素海进出水量变化及水量平衡初步分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 76-78. [Jiang Zhongfeng, Li Changyou. Preliminary analysis of lnflow and outflow changes and water balance of Wuliangsu Lake[J]. Yellow River, 2013, 35(9): 76-78.]

[18] Li D, Zhang J, Wang G, et al. Impact of changes in water management on hydrology and environment: A case study in north China [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2020, 28: 75-84.

[19] 万芳. 乌梁素海生态补水研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011. [Wan Fang. Study on ecological water replenishment in Wuliangsuhai[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.]

[20] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9-19. [Su Longfei, Li Zhenxuan, Gao Fei, et al. A review of remote sensing image water extraction[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(1): 9-19.]

[21] Mcfeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

[22] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. [Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.]

[23] 周成虎. 遥感影像地学理解与分析[D]. 北京: 科学出版社, 1999. [Zhou Chenghu. Understanding and analysis of remote sensing image geoscience[D]. Beijing: Science Press, 1999.]

[24] Smith R G A L. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Rome, FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[25] 王鹏飞, 郭云艳, 周康, 等. 1961—2018年呼伦湖水面面积变化特征及其对气候变化的响应[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 792-800. [Wang Pengfei, Guo Yunyan, Zhou Kang, et al. Variation of lake area of Hulun Lake during 1961—2018 and its response to climate change[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(4): 792-800.]

[26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 120-127. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 120-127.]

[27] 田昊玮, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 博尔塔拉河源流区径流对气候变化的响应及预测[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1432-1442. [Tian Haowei, Chen Fulong, Long Aihua, et al. Response and prediction of runoff to climate change in the headwaters of the Bortala River [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1432-1442.]

[28] 李秀, 郎琪, 雷坤, 等. 1958—2018年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J]. 气候与环境研究, 2021, 26 (3): 323-332. [Li Xiu, Lang Qi, Lei Kun, et al. Variation characteristics of pan evaporation and the influencing factorsin the Yongding River Basin during 1958—2018[J]. Climatic and Environmental Research, 2021, 26(3): 323-332.]

[29] 孟爽, 姚亦鹏, 胡冰涛, 等. 蒙新高原岱海夏季叶绿素a浓度空间分布及影响因子[J]. 湖泊科学, 2023, 35(4): 1255-1268. [Meng Shuang, Yao Yipeng, Hu Bingtao, et al. Daihai of Mengxin Plateau spatial distribution characteristics of chlorophyl-a concentration in summer and its influencing factors in lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(4): 1255-1268.]

[30] 马龙, 吴敬禄. 近50年来内蒙古河套平原气候及湖泊环境演变[J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 871-877. [Ma Long, Wu Jinglu. Climate and lake environment change in the Hetao Plain of Inner Mongolia in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(6): 871-877.]

[31] 张保龙, 于亮亮, 赵宇新, 等. 乌梁素海流域近60年气候变化特征研究[J]. 宁夏工程技术, 2021, 20(4): 289-294. [Zhang Baolong, Yu Liangliang, Zhao Yuxin, et al. Analysis of climate change characteristics in Wuliangsu Lake Basin in recent 60 years[J]. Ningxia Engineering Technology, 2021, 20(4): 289-294.]

[32] Chen Z, An C, Tan Q, et al. Spatiotemporal analysis of land use pattern and stream water quality in southern Alberta, Canada[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2021, 242: 103852, doi: 10.1016/j.jconhyd.2021.103852.

[33] 李山羊, 郭华明, 黄诗峰, 等. 1973—2014年河套平原湿地变化研究[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 19-29. [Li Shanyang, Guo Huaming, Huang Shifeng, et al. Variation in Hetao Basin wetlands from 1973 to 2014[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 19-29.]

[34] 李帅, 曲伟, 张婷婷, 等. 基于遥感影像的乌梁素海水面面积及水量变化研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(增刊1): 22-23. [Li Shuai, Qu Wei, Zhang Tingting, et al. Study on sea surface area and water volume change of Wuliangsu Sea based on remote sensing images[J]. Yellow River, 2023, 45(Suppl. 1): 22-23.]

[35] Gyau-Boakye P. Environmental impacts of the Akosombo Dam and effects of climate change on the lake levels[J]. Environment, Development and Sustainability, 2001, 3(1): 17-29.

[36] 张娜, 乌力吉, 刘松涛, 等. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 192-197. [Zhang Na, Wu Liji, Liu Songtao, et al. The characteristics of climate change and its influence on water area of Hulun Lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 192-197.]

[37] 张文星. 乌梁素海湿地芦苇空间分布信息提取及地上生物量遥感估算[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017. [Zhang Wenxing. Extraction of spatial distribution information of *Phragmites augustrum* in Wuliangsuhai wetland and remote sensing estimation of aboveground biomass[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017.]

[38] 于瑞宏, 李畅游, 刘廷玺, 等. 乌梁素海湿地环境的演变[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 948-955. [Yu Ruihong, Li Changyou, Liu Tingxi, et al. Change of wetland environment in Wuliangsuhai[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 948-955.]

Area change characteristics of Wuliangsuhai Lake driven by climate change and human activities in the basin in the past 40 years

SUN Jinrong[1], LI Xing[2], WEI Jingting[3]

(1. College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Engineering Research Center of Water-Saving Agriculture, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Science Society, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: The variation in lake area is a key indicator of climate change and human activities within a basin. The spatiotemporal dynamics of lake area are essential for assessing changes in the lake's ecological environment and their impacts. Utilizing the Landsat series of satellite images, this study applies the normalized difference water index (NDWI), the modified normalized difference water index (MNDWI), the interspectral relationship method, and the maximum likelihood supervised classification technique to extract the area of Wuliangsuhai Lake, Inner Mongolia, China. A comparative analysis was conducted to evaluate the performance of these four water body indices. The supervised classification method, which demonstrated the highest precision, was employed to extract the area of Wuliangsuhai Lake from 1986 to 2021, and the lake's change trend was analyzed. Additionally, the trends and abrupt changes in temperature, precipitation, relative humidity, and potential evapotranspiration in the Wuliangsuhai Lake were analyzed using univariate linear regression, the M-K trend test, and the mutation test. The results indicate that the lake surface area of Wuliangsuhai Lake expanded from 316.19 km^2 to 332.34 km^2, reflecting an increase of 5.11%. Temperature and precipitation showed a significant upward trend, while relative humidity and potential evapotranspiration also increased, indicating overall warming in the basin. From 2002 to 2021, the sown area of crops demonstrated a strong positive correlation with lake area, with GDP contributing 76.83%, population contributing 18.37%, and potential evapotranspiration contributing 7.73% to the overall change.

Key words: lake area; water index; climate change; human activities; drivers